

MTBF（平均 故障間隔）の 解説と規準

ウェンディ トレル
ビクター アヴェレール

White Paper #78

APC[®]
Legendary Reliability™

要約

平均故障間隔(MTBF : Mean Time Between Failure)は多くの業界で漠然と信頼性を表す用語として使われ、最近では乱用される傾向にあります。本来の意味とすりかわり、混乱や不信を招いています。MTBFは故障の前提条件と定義に大きく依存しているため、これらに注意して正確に解釈する必要があります。このホワイトペーパーでは、MTBFに対する誤解とその根底にある複雑さを解説し、MTBFのさまざまな計算方法を紹介します。

はじめに

過去60年以上に渡ってMTBFはさまざまな事項の決定根拠となってきました。この数年でも20以上の耐用期間を予測する方法や手順が作り出されました。MTBFが果てのない討論会の議題となるのも不思議ではないでしょう。この傾向はITや通信機器を保有する重要施設の設計分野では特に顕著です。数分のダウンタイムが企業の市場価値にマイナスの影響を与えるため、ネットワークに必須の物理インフラ（NCPI）に信頼性があるかどうかは重要です。そして、MTBFを十分に理解することにより、企業が目標とする信頼度に到達することができます。本書では例を使ってMTBFを各側面から解説します。複雑な部分を単純化し、誤解されやすい部分を明らかにしていきます。

故障とは何か？ その前提条件とは？

この質問はMTBF値を検討するときに多く尋ねられる質問です。故障を定義しないでMTBFが引用される場合がありますが、この質問に対する回答がなければ間違った方向に結論を導くだけでなく、MTBF値もほとんど意味をなしません。例えて言うなら、自動車の燃費効率を「満タンの走行距離」で宣伝しながらタンクの総容量を記載しないようなものです。故障の定義があいまいなのは、故障に2つの基本的な意味があることが原因です。

- 1) 機能を実行するための製品全体の動作が停止したこと¹
- 2) 製品全体としての動作は継続しているが、一部の要素の必須機能が実行不可能²であること

次の2つの例は、製品のある状態が上記の定義によって故障として分類されるかどうかを示すものです。

例1：

RAIDアレイの冗長ディスクが故障した場合、重要なデータを任意に供給するというRAIDアレイの必須機能は実行できますが、データの保管というディスクアレイコンポーネントの必須機能が作動しなくなります。この状態は1)の定義に従うと故障ではありませんが、2)では故障となります。

例2：

UPSのインバータが故障してUPSがバイパス回路に切り換わった場合、重要な負荷に電力を供給するというUPSの必須機能は実行できますが、安定化された電力を供給するというUPSコンポーネントの必須機能が使用できなくなります。例1と同じように、これも2)の定義では故障となります。

¹ IEC-50：International Electrotechnical Commission (国際電気標準会議) 規格

² IEC-50：International Electrotechnical Commission (国際電気標準会議) 規格

この様に定義が2つだけであれば、故障を定義することは簡単かもしれませんが。しかし残念なことに、製品の評価に関わるとなると、この件はMTBF自体と同様に複雑になります。実際には故障の定義は2つ以上あり、また無限にあるとも言えるのです。製品の種類によって、多数の故障の定義を使い分けている製造者もいます。プロセスコントロールなどの目的で全状態の故障を記録し、製品の欠点を改善していくという品質重視の製造者もいます。彼らは故障を正確に定義するために次のような質問を追加します。

- ① ユーザが不正な使用をした場合も故障と考えられるでしょうか？ 設計者が見落とした要因が、ユーザの誤用につながる場合があります。
- ② 修理業者の操作が原因で機器が停止した場合は故障と考えられるでしょうか？
- ③ 製品の設計自体がすでに製品の故障率を上げることはありますか？
- ④ コンピュータのLED (警告ランプ)が作動しなくなった場合、コンピュータの動作には影響がなくても故障と考えられますか？
- ⑤ バッテリなどの消耗品が耐用期間未満で使用不可能になった場合は故障と考えられますか？
- ⑥ 輸送時の損傷は故障でしょうか？ これは梱包設計が不十分であった可能性を示しています。

故障の定義の重要性は明らかで、MTBF値の解釈を行う前に故障の定義を理解しておかなければなりません。これらの質問は、信頼性のある決定をするための基盤となります。

エンジニアは間違いを犯さない、ただ前提条件が間違っているのだとよく言われます。同様のことがMTBF値を推定する人たちにも言えるでしょう。MTBFの推定過程を簡単にするためには、前提条件が必要です。正確な数値の算出に必要なだけのデータを集めることはほぼ不可能です。しかし、全ての前提条件は現実的なものでなければなりません。ここからは、MTBFの推定に使用される一般的な前提条件を説明します。

信頼性、可用性、MTBF、MTTRの定義

信頼性と可用性

MTBFは信頼性と可用性の両方に影響を与えます。MTBFを説明する前に、これらの概念のしっかりした基礎を作ることが重要です。高可用性と高信頼性は関連していることが多いのですが、互換性のある用語ではありません。

信頼性とは、システムやコンポーネントが指定された期間・条件下で必須機能を動作させることのできる能力を指します[IEEE 90]³。

言い換えると、システムやコンポーネントが故障しないで一定時間稼働するであろうという見込みのことです。この概念を説明する一例に飛行機があります。飛行機には、離陸から着陸までの間、大惨事に遭わず予定通り無事にフライトを終えられるであろうという見込み(信頼性)があります。

可用性とは、システムやコンポーネントが必要に応じて稼働・アクセス可能であるかというその可能性の度合いを指します[IEEE 90]。

あるいは、与えられた条件下で、システムやコンポーネントがその必須機能を作動できる状態であろうという見込みのことです。可用性はシステムの信頼性と故障したときの回復時間によって決まります。システムが長期的に稼働する場合(例：10年間運用するデータセンタ)、故障は避けられません。故障が発生するとシステムがいかに短時間で復旧するかということが重要になり、可用性が注目されます。例に挙げたデータセンタでは信頼性のあるシステムの設計が最も大切な要素ですが、いったん故障すると、IT機器とビジネス業務をできるだけ早く稼働状態に戻してダウンタイムを最小限に抑えることが最重要になります。

MTBF

MTBF(平均故障間隔)はシステムの信頼性を量る基本的な尺度です。よく使われる単位は時間です。MTBFの数値が高いほど製品の信頼性も高くなります。式1はこの関係を示します。

$$\text{信頼性} = e^{-\left(\frac{\text{時間}}{\text{MTBF}}\right)} \quad \text{式1}$$

³ IEEE90 : The Institute of Electrical and Electronics Engineers (米国電気電子学会)

MTBFをシステムが故障するまでの予測稼働時間や「耐用期間」と同じものであると誤認している場合がよくあります。しかし、ある装置が100万時間のMTBFを持つことは珍しくありませんが、100年以上故障なしで稼働すると考えることは非現実的です。数値がこれほど高くなるのは、製品が最も安定している「使用可能期間」または「標準稼働期間」内の故障率を算出し、永久にこのこのような確率で故障を繰り返すとしているからです。実際には製品の磨耗によって、MTBF値よりも早い時期に使用できなくなります。つまり、製品の耐用期間と故障率またはMTBFの間には直接的な相関関係はありません。非常に高い信頼性(MTBF)を持ちながら耐用期間が低い製品が存在することも考えられます。人間を例にとってみましょう。

25歳の人が50万人いるとします。

1年間にこの中の何人が故障(死亡)したかというデータを収集します。

この人口の稼働年数は、50万人 × 1年 = 50万人年です。

1年で625人が故障(死亡)したとすると、

故障率は、625故障 ÷ 50万人年 = 0.125% / 年です。

MTBFは故障率の逆数、 $1 \div 0.00125 = 800$ 年です。

しかし、寿命(耐用年数)が800年という人間は存在しません。

つまり、25歳の人たちは高いMTBF値を持ちますが、耐用年数はそれよりもかなり

短く、MTBFと耐用年数に相関関係はありません。

人間の故障率は一定ではありません。年をとるにしたがって、故障が多くなります(磨耗)。耐用期間と同一基準でMTBFを計算する真の方法は、25歳の人たちをサンプルとする場合、50万人全員が寿命尽きるまで待ち、平均的な寿命を計算します。その結果は75-80年以上になると推測されます。

25歳の人たちのMTBFは何でしょうか? 80それとも800でしょうか? 答えは両方です。どのようにしたら同じ人口が2つの大きく異なるMTBF値を持つのでしょうか? それは全て前提条件に関係しています。

80年のMTBFが製品(この場合は人間)の寿命をより正しく反映しているとしたら、こちらの方がよい方法なのでしょうか? 明らかにこれはより直観的なものです。しかし、こちらの方法をUPSシステムなどの商業製品に適用するには、いくつかの問題点があります。最大の問題は時間です。この方法を実行するには、サンプル年齢の全人口の寿命を待たなければなりません。製品に置き換えると10年から15年かかります。そのうえ、それだけの期間待ったとしても、製品の所在を確認できないという問題が出てきます。例えば、廃棄したという報告を受けていなければ、製造者は製品がまだ使用されているのかどうか分かりません。

技術は日々進歩しているので、例え上記の問題を解決できたとしても、数値が算出されるころにはその利用価値がなくなっています。数世代に渡るテクノロジーの進化ですでに不要となった製品のMTBF値には使い道がありません。

MTTR

MTTR(Mean Time To Repair:平均復旧時間)はシステムが故障してから復旧するまでにかかる予想時間です。問題の診断に必要な時間や修理業者が到着するまでの時間、そして実際の修理にかかる時間を含みます。MTBFと同じようにMTTRの単位も時間です。式2が示すように、MTTRは可用性に影響を与えますが、信頼性とは無関係です。MTTRの数値が高いほど、システムの修理に時間がかかることを意味します。また、故障から復旧するまでに時間がかかるほど、可用性が低くなります。以下の式2はMTBFとMTTRがどのようにシステムの全体的な可用性に影響を与えるかを示します。MTBFが上がると可用性も向上します。MTTRが上がると可用性は低下します。

$$\text{可用性} = \frac{MTBF}{(MTBF + MTTR)} \quad \text{式2}$$

式1と式2を有効にするために、システムのMTBFを分析するときの基本的な前提条件を決定します。機械システムと異なり、ほとんどの電子システムには磨耗故障期間が早く来る可動部分がありません。結果として、一般的に耐用期間中(標準稼働期間中)の電子システムやコンポーネントの故障率は一定になるとされています。図1は「バスタブ曲線」と呼ばれる故障率で、上に示した一定の故障率を図解しています。この曲線の「標準稼働期間」は製品が使用されている期間で、製品の質が均一化されて故障率が安定しています。この段階での故障の原因には、検出が困難な欠陥や安全設計の低さ、予想外に変動的なストレス、人為的エラー、自然故障があります。製造者によるコンポーネントの十分な通電テスト、正しい管理、老朽化した部品の取り換えなどが「磨耗期間」の故障率の上昇を緩和します。

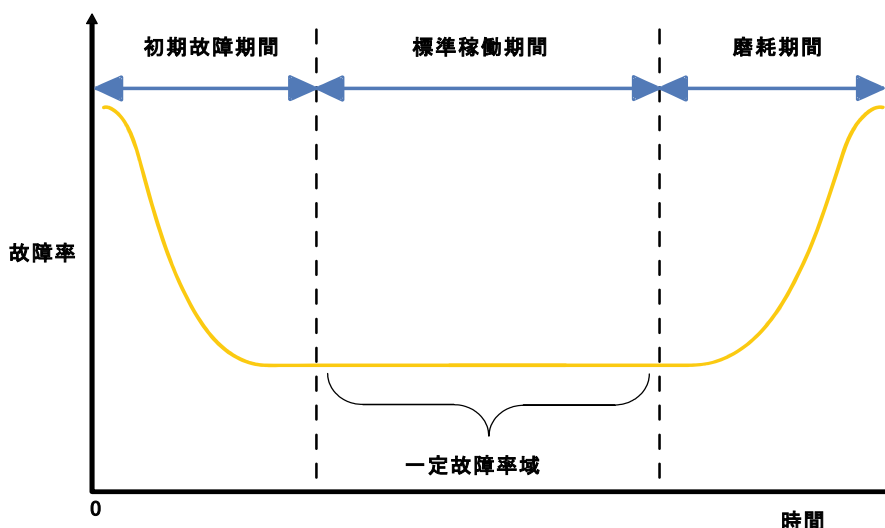


図1 – 一定の故障率を示すバスタブ曲線

ここまでは、MTBFを正しく解釈するための信頼性と可用性の相違と、その概念の背景について説明してきました。次項ではMTBFのさまざまな予測方法を紹介します。

MTBFの予測方法と推定方法

「予測」と「推定」という用語は入れ替えて使われることがありますが、それは間違いです。

MTBFを予測する方法はシステム設計のみを基準に数値を算出します。通常は製品耐用期間の初期に行いその方法は、スペースシャトルや新製品の設計など、フィールドデータが不足している場合や全く存在しない場合に有効です。十分なフィールドデータがあるときは予測方法を使用しません。故障の実際のデータがあるときはMTBFを推定する方法を使用します。推定方法は類似システムの観測結果を基準に数値を算出します。通常は大量のサンプルデータが収集された後で実行します。現場で実際に使用されている製品を基準にしているので、MTBFを計算するときはこちらの方法が頻繁に用いられます。

どちらの方法も基本は統計です。実際のMTBFに近い、おおよその値を示します。業界内で標準化されている方法はありません。製造者がそれぞれの製品を理解して最適の方法を選択することが重要です。以下にMTBFを算出する方法の一部を紹介します。

信頼性予測方法

信頼性を予測する最も簡単な方法は、ドイツ人の科学者Von Braunと数学者Eric Pieruschkaが1940年代に編み出しました。V-1ロケットの多くの信頼性問題に対処しているとき、Von BraunはPieruschkaの助けを得てロケットの信頼性をモデル化し、最初の斬新な信頼性予測モデルを書き記しました。続いて、NASAと原子力産業界が信頼性分析の分野をより発展させました。今日ではMTBFを予測する方法は数多くあります。

MIL-HDBK 217（米国防総省信頼度予測モデル）

米国陸軍によって1965年に出版された『Military Handbook 217』は、陸軍の電子機器とシステムの信頼性を推定するための基準を示し、信頼性の向上を目的に作成されました。2つ以上の類似設計品を比較するための共通基盤を定義しています。この本は「Mil Standard 217」または単に「217」とも呼ばれ、部品点数法と部品ストレス分析法の2つの方法を使って信頼性を予測しています。

部品点数法

製品の開発初期に信頼性を予測するときに使用します。信頼性の目標や仕様に関連したおおまかな信頼性を算出します。故障率は製品の類似コンポーネント(例：コンデンサ)を数えて種類別に分類して(例：フィルムコンデンサ)算出します。分類されたコンポーネントの数に一般的な故障率と「217」に記載されている品質係数を掛け、全ての分類項目の故障率を足して最終的な故障率を出します。定義上、部品点数法は全てのコンポーネントが連結しているものとしています。分離されているコンポーネントの故障率は個別に計算する必要があります。

部品ストレス分析法

実際の回路とハードウェアがほぼ生産開始となる製品開発の後期に使用します。故障率が足し算される場所は部品点数法と同じですが、部品ストレス分析法では、各コンポーネントの故障率はそれぞれ特定のストレスレベルを基準に算出されます(例：湿度、温度、振動、電流)。正しいストレスレベルを割り当てるには、製品設計と予期される環境について記録し、理解しなければなりません。通常、部品ストレス法の故障率の方が部品点数法で計算した故障率より低くなります。また、分析レベルが複雑なため、部品点数法より長い計算時間がかかります。

今日では「217」はほとんど使用されません。1996年に米国陸軍が「信頼性がないことが証明され、間違った信頼性予測を引き出す可能性がある」という理由で「MIL-HDBK-217」の使用を中止することを発表⁴しました。この他にも「217」は多くの理由から使用されなくなりました。そのほとんどがコンポーネントの信頼性が数年の間に非常に大きく向上し、故障の主原因でなくなったことに関係しています。「217」の故障率は現在の電子コンポーネントより保守的な(高い)数値です。現在の電子製品の故障を徹底的に調査すれば、不正使用(人為的エラー)やプロセスコントロールまたは製品設計が大部分の故障の原因であることが明らかになるでしょう。

テレコディア

テレコディア信頼性予測モデルはテレコム業界で作られ、数年に渡って変更を繰り返してきました。最初にBellcore Communications Researchがテレコム機器の信頼性を予測するためにベルコアという名称で開発しました。ベルコアは「217」を基準にしていますが、信頼性モデル(方程式)はテレコム機器分野での知識を反映して1985年に変更されました。最新のベルコアは1997年12月付けのTR-322第6版です。SAICが1997年にベルコアを買収し、テレコディアと改名しました。最新のテレコディア予測モデルは2001年5月に発表されたSR-322第1版です。「217」の方法以外にも多くの計算方法を提供しています。今日でも製品設計ツールとして業界内で使用されています。

HRD5

HRD5とはテレコムシステムで使用されている電子コンポーネント用信頼性データのためのハンドブック(Handbook for Reliability Data for Electronic Components)のことです。HRD5はBritish Telecomが発見し、主にイギリスで使われています。「217」に類似していますが、それほど多くの環境変数を扱っていません。テレコムを含めた、広い範囲の電子コンポーネントの信頼性予測モデルを提供します。

⁴ 1996年発行『IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology. Part A』 Vol. 19, No. 2, 277~278ページに記載されたCushing M., Krolewski J., Stadterman T., Hum B. 著「U.S. Army Reliability Standardization Improvement Policy and Its Impact」

RBD (信頼性ブロック図)

信頼性ブロック図またはRBDは、システムの可用性と信頼性をモデル化した図であり、計算ツールでもあります。RBDの構造は、故障時のシステム内の論理的な相互作用を定義します。論理的または物理的な接続には関係ありません。各ブロックは、独立したコンポーネント、サブシステムなどを表します。システム全体やサブセット、または故障・信頼性・可用性の分析に必要なシステムの組み合わせたものを図解します。システムの各要素がどのように機能しているか、各要素がシステム動作全体にどのように影響を与えているかを表示する分析ツールとしても役立ちます。

マルコフモデル

マルコフモデルは電気機器などの複雑なシステムを分析します。これは状態空間図または状態グラフとも呼ばれています。状態空間とは、システムがなり得る可能性がある全ての状態を集めたものです。ブロック図とは異なり、状態グラフはシステムをより正確に描出します。状態グラフを使用すると、コンポーネントの故障の依存関係や、UPSのバッテリー使用状態などのブロック図では表示不可能なさまざまな状態を明らかにできます。マルコフモデルは、MTBFの他にも可用性やMTTR、任意の状態と時間における蓋然率など多くのシステム測定値を算出できます。

FMEA / FMECA

FMEA (故障モード・影響解析)は製品の故障モードの分析に使用されるプロセスです。これは各故障が製品に与える影響度を評価するので、製品設計の改良に役立ちます。各故障モードに厳密度を指定することでより詳しい結果を得られます。これはFMECA (故障モード・影響度・致命度解析)と呼ばれています。FMEAは下位から上位へアプローチする方法を取ります。UPSを例にとると、分析はプリント基板の部品から始まり、システム全体へと進みます。製品設計ツールとして以外に、システム全体の信頼性の計算にも利用できます。計算に必要な蓋然率データは、部品によって(複数の稼働状態やモードがある部品のデータは特に)入手困難な場合があります。

フォルトツリー

フォルトツリー分析はミニットマン発射管制システムの安全性を査定するためにベル研究所が開発した技術です。後になって信頼性分析にも適用されるようになりました。フォルトツリーは、部品レベルの故障につながる事象や、調査中(上位から下位へのアプローチ)の望ましくない事象を対象に、その事象の標準時と故障時の経路を詳述します。完全なフォルトツリーをそれに相応する数式に変換して信頼性を算出します。これには、ブール代数として知られる事象の代数学を使用します。FMEAと同じように、計算に必要な蓋然率データの入手は困難です。

HALT

HALT (高加速寿命試験)は製品設計の全体的な信頼性の増加に使用する方法です。温度や振動などのストレスを製品に与えたとき、どの程度製品に不具合が発生するかを測定する方法です。実際に使用される製品に故障が発生するまでの実時間を数学的モデルを使って予測します。MTBFの予測もできますが、HALTの主な機能は製品設計の信頼性の改善です。

信頼性推定方法

類似項目推定方法

これは、類似項目の過去の信頼性データを基準に信頼性の推定を迅速に行う方法です。基準となるデータを提供する機器と新機器との類似がどの程度あるかによって、この方法の有効性は異なります。製造過程、稼働環境、製品機能と設計において類似点がなければなりません。既存製品の改良版を対象にする場合は、今までの経験を利用できるのでこの推定方法が特に役立ちます。新規に設計された部分については十分に検討して、最終的な推定値を算出します。

フィールドデータ計測法

フィールドデータ計測法は製品の実際の使用経験を基準にします。これは製造者の品質管理プログラムの一部にもなっている、最も頻繁に使用されている方法です。信頼性経歴管理とも呼ばれます。製品の実際の故障率を記録することで、製造者は問題点を認識して欠点の改善に取り組むことができます。実際の故障を基準にするので、他の推定方法では見逃してしまう故障状況も含まれます。この方法は、サンプルとする新製品を記録しておき、そこから故障データを収集します。データが集まったら故障率とMTBFを計算します。故障率とは、暦年の間に「故障」するであろうと予想される数を全体数に対する割合で示したものです。データは品質管理以外に、顧客やパートナー向けの製品の信頼性や品質情報としても使用できます。この方法は製造者によって非常に広範囲に採用されています。つまり、MTBF値を比較するための共通基盤があるということです。製品間で信頼性を比較評価でき、製品仕様や購入決定を左右するツールとなります。どの比較でも同様ですが、比較する全てのシステムに対して重要な変数は同じでなければなりません。そうでない場合、間違った決定を生み出し、経済的被害を受ける可能性があります。

結論

MTBFはIT業界で一般的に使用される「専門用語」です。実際には何を示しているのか理解されないまま数値だけが一人歩きしているという現実があります。MTBFは信頼性の目安であり、製品の耐用期間を示しているわけではありません。故障の定義がなく前提条件が非現実的な場合や存在しない場合には、MTBF値は意味を成さないため正しく理解する必要があります。

参考文献

1. Pecht, M.G., Nash, F.R., "Predicting the Reliability of Electronic Equipment", Proceedings of the IEEE, Vol. 82, No. 7, July 1994
2. Leonard, C., "MIL-HDBK-217: It's Time To Rethink It", Electronic Design, October 24, 1991
3. <http://www.markov-model.com>
4. MIL-HDBK-338B, Electronic Reliability Design Handbook, October 1, 1998
5. IEEE 90 – Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE Standard Computer Dictionary: A Compilation of IEEE Standard Computer Glossaries. New York, NY: 1990

著者について

ウェンディ トレルは可用性エンジニアで、ロードアイランド州ウエストキングストンにあるAPC本社に勤務しています。クライアントと可用性の科学的アプローチについて協議し、それぞれのデータセンター環境の可用性を最適化する方法を検証しています。ニューヨーク州スケネクタディのUnion Collegeで機械工学を専攻し、学士号を取得しました。彼はASQ (米国品質学会)の公認可用性エンジニアです。

ビクター アヴェレールはAPCの可用性エンジニアです。クライアントの電気システムやデータセンター設計の可用性に関する助言や分析を担当しています。1995年にRensselaer Polytechnic Instituteで機械工学を専攻して学士号を取得しました。彼はASHRAEとASQの会員です。